



**Fábio Alexandre
Baptista Rendeiro**

**Caraterização do comportamento à compressão
de laminados compósitos**



**Fábio Alexandre
Baptista Rendeiro**

**Caraterização do comportamento à
compressão de laminados compósitos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Alfredo Morais Balacó de Morais Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

"Só sabemos com exactidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida."

Johann Wolfgang von Goethe

O júri

Presidente / President

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Rui Jorge Sousa Costa de Miranda Guedes

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a todos que contribuíram de forma directa ou indirecta para conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Alfredo Balacó de Moraes, por todo o auxílio prestado tanto a nível de disponibilidade, ajuda e paciência. Foi um prazer ter um orientador com tamanha sabedoria e conhecimento.

Ao meu co-orientador Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira por toda a ajuda e disponibilidade na execução componente prática. Agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas previsões experimentais.

Aos meus amigos por todo o apoio nos bons e maus momentos.

Aos colegas e amigos que me acompanharam durante o curso por todo o companheirismo e alegria facilitando assim esta jornada.

À minha família por toda a confiança depositada em mim, e de me terem dado a oportunidade de evoluir e tornar-me uma pessoa melhor.

Um agradecimento especial à Silvandra Teixeira, pelo incentivo, compreensão e encorajamento. E ainda por toda a paciência e apoio demonstrado ao longo deste percurso.

Palavras-chave

Compósitos carbono/epóxico, laminados cruzados, ensaios de compressão, ensaios de flexão, delaminação, módulo de elasticidade, tensão de ruptura longitudinal da camada

Resumo

Os materiais compósitos são amplamente usados em estruturas de alto desempenho tanto na terra, como no ar e na água. Não obstante, prossegue a investigação no sentido de atingir um melhor conhecimento das propriedades mecânicas destes materiais através da realização de ensaios.

Neste trabalho efetuou-se um estudo experimental visando medir a resistência à compressão longitudinal da camada recorrendo principalmente ao ensaio de provetes híbridos desenvolvido recentemente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Concretamente, ensaiaram-se três tipos de laminados cruzados mas os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão longitudinal da camada ficaram aquém do esperado face a valores medidos em trabalhos anteriores. Isto deveu-se provavelmente a problemas de preparação das amostras.

Por seu turno, realizaram-se também ensaios de flexão nos mesmos laminados recorrendo a roletes de plástico em vez dos roletes metálicos habitualmente usados. Procurou-se assim evitar o fenómeno de encurvadura por delaminação observado em trabalhos anteriores. Apesar deste fenómeno não ter sido evitado, verificou-se que ocorreu a tensões bastante mais elevadas, o que indica que esta pode ser uma abordagem interessante para medir a resistência à compressão longitudinal da camada.

Keywords

Carbon/epoxy composites, cross ply laminates, compression tests, bending tests, delamination, Young's modulus, ply longitudinal compressive strength

Abstract

Composite materials are nowadays used in high performance structures on land and in the air and water. Nevertheless, research continues in order to reach a better understanding of the mechanical properties of these materials through testing.

The present work consisted of an experimental study aimed at measuring the ply longitudinal compressive strength using mainly a hybrid specimen method recently developed in the Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro. Specifically, three types of cross ply laminates were tested, but the results obtained for the modulus of elasticity and ply longitudinal compressive strength were lower than expected compared to the values measured in the previous works. This was probably due to sample preparation problems.

Bending tests were also conducted on identical laminates. Plastic rollers were used instead of the common metal rollers in order to avoid the delamination buckling phenomenon observed in previous studies. While this phenomenon has not been prevented, it was found that it occurred at much higher loads. Therefore, this could be an interesting approach for measuring the ply longitudinal compressive strength.

ÍNDICE

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas	v
Capítulo 1 Introdução	7
1.1 Os laminados compósitos	7
1.2 Teoria Clássica dos Laminados.....	9
1.3 Ensaio de compressão	12
1.4 Ensaio de flexão.....	15
1.5 Objetivo do trabalho.....	17
Capítulo 2 Procedimentos experimentais	19
Capítulo 3 Tratamento de dados	25
Capítulo 4 Resultados Experimentais	27
4.1 Ensaio de compressão de provetes [90°]	27
4.2 Ensaio de compressão de provetes híbridos.....	30
4.3 Ensaio de Flexão	39
Capítulo 5 Conclusões e trabalhos futuros.....	45
Capítulo 6 Referências Bibliográficas	47
Capítulo 7 Anexos.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Orientações principais da camada unidireccional.....	8
Figura 2 Esforços considerados pela Teoria Clássica dos Laminados. O referencial está no plano médio da placa e o eixo z na direcção da espessura.	9
Figura 3 Rotação de referencial {xyz} para {123} [Moura e outros, 2005].	11
Figura 4 Formas de transmissão carga em ensaios compressão [Hodgkinson, 2000].	12
Figura 5 Representação esquemática do ensaio ASTM D695 modificado para laminados $[0]_n$ [Moura e outros, 2005].	13
Figura 6 Dispositivo IITRI [Moura e outros, 2005].	14
Figura 7 Dispositivo de ensaio CLC [Adams, 2005].	14
Figura 8 Representação do provete híbrido proposto por Neves (2009) [Neves e outros, 2011].	15
Figura 9 Representação esquemática de um ensaio à flexão em 3 pontos [Moura e outros, 2005].	16
Figura 10 Representação esquemática de um ensaio à flexão em 4 pontos [Moura e outros, 2005].	16
Figura 11 Esquema ilustrativo de um ensaio de flexão em 4 pontos com um provete <i>sandwich</i>	17
Figura 12 Provete híbrido para ensaios de compressão com as dimensões em mm.	20
Figura 13 Fase inicial da elaboração do provete híbrido, perfil em I.	21
Figura 14 Colocação dos perfis em I no molde para vazamento da Araldit Standard.	21
Figura 15 Vazamento da Araldit Standard.	21
Figura 16 Fotografia de um ensaio de compressão.	22
Figura 17 Fotografia de provete híbrido com as marcas ópticas coladas.	23
Figura 18 Representação esquemática da configuração do ensaio de flexão em 4 pontos [Fernandes, 2011].	23
Figura 19 Fotografia do mecanismo para ensaio à flexão em 4 pontos.	24
Figura 20 Representação esquemática da medição de deslocamentos no ensaio de flexão em 4 pontos [Fernandes, 2011].	24
Figura 21 Comparação entre as curvas tensão-deformação à compressão: curva real e curva após o tratamento de dados acima descrito.	25
Figura 22 Curvas tensão-deformação típicas dos laminados fibra de carbono com comprimento de 20mm.	27
Figura 23 Curvas tensão-deformação típicas dos laminados fibra de carbono com comprimento de 25mm.	28
Figura 24 Fotografias dos provetes U90 com comprimento 20mm onde são visíveis fissuras inclinadas e delaminagens.	29
Figura 25 Fotografias dos provetes U90 com comprimento 25mm onde são visíveis fissuras inclinadas e delaminagens.	30
Figura 26 Curvas tensão-deformação típicas de laminados $C1 = [(0/90)_6/0]$	31

Figura 27 Curvas tensão-deformação típicas de laminados C2= [(0/90 ₂)4/0]	31
Figura 28 Curvas tensão-deformação típicas de laminados C3 = [(0/90 ₃)3/0]	32
Figura 29 Módulo de elasticidade medido para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL. Os desvios padrão foram de 2,06% para C1, 8,21% para C2 e 2.30% para C3.	33
Figura 30 Deformações de rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 11,11% para C1, 2,52% para C2 e 4,53% para C3.	33
Figura 31 Tensões de rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 1,50% para C1, 1,25% para C2 e 4.31% para C3.	34
Figura 32 Estimativas da tensão de rotura longitudinal da camada em cada laminado. Os desvios padrão foram de 5,32% para C1, 1,25% para C2 e 4.31% para C3.	35
Figura 33 Fotografia de provete híbrido do laminado C3 = [(0/90 ₃)3/0] após ensaio com esmagamento nos topos visível.	35
Figura 34 Ampliação da zona de rotura à compressão de provete híbrido do laminado C3 = [(0/90 ₃)3/0].	36
Figura 35 Fotografia de provete híbrido do laminado C3 = [(0/90 ₃)3/0] após ensaio em que é visível a rotura segundo direção oblíqua.	36
Figura 36 Fotografias de provete híbrido à compressão do laminado C2 = [(0/90 ₂)4/0] após ensaio: (a) esmagamento nos topos e delaminação (b) rotura segundo direção oblíqua e delaminação.	37
Figura 37 Fotografias de provete híbrido à compressão do laminado C1 = [(0/90 ₆)6/0] após ensaio: (a) esmagamento nos topos e delaminação (b) esmagamento nos topos.	38
Figura 38 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C1 = [(0/90 ₆)6/0].	39
Figura 39 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C2 = [(0/90 ₂)4/0].	39
Figura 40 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C3 = [(0/90 ₃)3/0].	40
Figura 41 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C1 = [(0/90 ₆)6/0] no instante da rotura.	40
Figura 42 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C2 = [(0/90 ₂)4/0] no instante da rotura.	41
Figura 43 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C3 = [(0/90 ₃)3/0] no instante da rotura.	41
Figura 44 Ampliação da zona de rotura à flexão de provete do laminado C3 = [(0/90 ₃)3/0].	41
Figura 45 Módulo à flexão medido para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL. Os desvios padrão foram de 2.28% para C1, 1.96% para C2 e 5.41% para C3.	42
Figura 46 Tensões à rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 7,72% para C1, 4,84% para C2 e 8.90% para C3.	42
Figura 47 Tensões longitudinais σ_1 nas camadas a 0° no momento da rotura.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades da camada do carbono/epóxico usado. A espessura nominal da camada é 0.15 mm [Morais e Pereira, 2007; Fernandes, 2011].....	19
Tabela 2 Laminados usados neste trabalho.....	20
Tabela 3 Distância média entre as marcas ópticas.	22
Tabela 4 Resultados dos ensaios de compressão dos laminados U90	28
Tabela 5 Resumo dos valores do módulo de elasticidade medido para cada provete híbrido, valor médio da amostra e previsão da TCL.	49
Tabela 6 Resumo dos valores da deformação de rotura medido para cada provete híbrido, valor médio da amostra e desvio padrão.	49
Tabela 7 Resumo dos valores das tensões à rotura medida para cada provete híbrido, valor médio da amostra e desvio padrão.....	49
Tabela 8 Resumo de estimativas da tensão de rotura longitudinal da camada em cada laminado, valor médio da amostra e desvio padrão.	50
Tabela 9 Resumo dos valores do módulo de elasticidade medido para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL.....	51
Tabela 10 Resumo dos valores das tensões à rotura medida para cada provete, valor médio da amostra e desvio padrão.....	51
Tabela 11 Resumo dos valores das tensões longitudinais σ_1 nas camadas a 0° no momento da rotura.	51

Capítulo 1 **INTRODUÇÃO**

1.1 OS LAMINADOS COMPÓSITOS

Os materiais com aplicações estruturais podem ser divididos em quatro grupos: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos [Gibson, 2007]. Um material compósito resulta da união entre dois ou mais materiais distintos que, ao se combinarem, formam um novo material com uma estrutura estável e com propriedades diferentes das dos outros três grupos. Deste modo é possível obter um material com propriedades que não se conseguiriam atingir com cada componente isolado. Um compósito é constituído pela matriz e pelo reforço, que se ligam ao nível da superfície de contacto e conservam as suas propriedades químicas e físicas. A matriz aglomera o reforço e permite dar forma ao compósito, enquanto que o reforço é responsável pelas propriedades excepcionais do compósito. Os compósitos são atualmente usados em quase todo o tipo de estruturas de alto desempenho, tanto na terra, como no ar e na água [Squires e outros, 2006]. Neste grupo de materiais, adquiriram particular destaque os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras contínuas de vidro, aramida ou carbono. Esta clara preponderância em aplicações estruturais deve-se à elevada rigidez e resistência mecânica, ao baixo peso específico, e também à relativa facilidade de processamento [Moura e outros, 2005]. De facto, foram desenvolvidos vários processos de fabrico de materiais compósitos que vão desde a simples moldação manual à sofisticada moldação por autoclave [Mazumdar, 2002].

Os compósitos estruturais têm frequentemente a forma de laminados de camadas de fibras unidireccionais (UD). O número de camadas e as orientações de cada uma delas

podem ser adaptadas às solicitações, conferindo assim grande flexibilidade no projeto. Além disso, o comportamento mecânico do laminado pode ser obtido a partir do comportamento da camada mediante vários modelos, o mais conhecido dos quais é a Teoria Clássica dos Laminados (TCL). A caracterização do comportamento mecânico da camada através de ensaios mecânicos assume, por isso, grande relevância.

A camada UD é acentuadamente anisotrópica. Para definir as suas propriedades consideram-se 3 eixos principais (figura 1): o eixo dito longitudinal “1”, que coincide com a direção das fibras, o eixo “3” segundo a direção da espessura da camada e o eixo dito transversal “2” que conduz a um referencial espacial “123”.

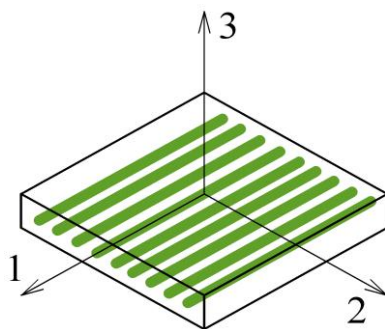


Figura 1 Orientações principais da camada unidireccional.

Face à ortotropia e à isotropia transversal (no plano a que pertencem os eixos “2” e “3”), o comportamento linear elástico da camada é completamente caracterizado conhecendo o módulo de elasticidade longitudinal E_1 , o módulo de elasticidade transversal E_2 , o coeficiente de Poisson longitudinal ν_{12} , o módulo de corte longitudinal G_{12} e o coeficiente de Poisson transversal ν_{23} [Moura e outros, 2005]. Relativamente às resistências, a caracterização da camada exige a determinação das resistências à tração longitudinal σ_{ut1} , à compressão longitudinal σ_{uc1} , à tração transversal σ_{ut2} , à compressão transversal σ_{uc2} , ao corte longitudinal τ_{u12} e ao corte transversal τ_{u23} . Não obstante, as propriedades mais importantes da camada são o módulo E_1 e as resistências σ_{ut1} e σ_{uc1} , que mais beneficiam das excelentes propriedades das fibras.

1.2 TEORIA CLÁSSICA DOS LAMINADOS

A Teoria Clássica dos Laminados (TCL) é o modelo mais usado para descrever o comportamento dos laminados a partir do comportamento da camada. Como o tratamento dos resultados experimentais se baseou em parte na TCL, procede-se de seguida a uma breve revisão desta teoria [Moura e outros, 2005]. A TCL tem por base a Teoria das Placas de Kirchhoff para materiais isotrópicos. Ela considera (figura 2):

- momentos flectores M_x , M_y , e momento torçor $M_{xy} = M_{yx}$, que se designam genericamente por “esforços de flexão”;
- esforços ditos de “membrana”, que são as forças normais N_x e N_y , e as forças de corte $N_{xy} = N_{yx}$.

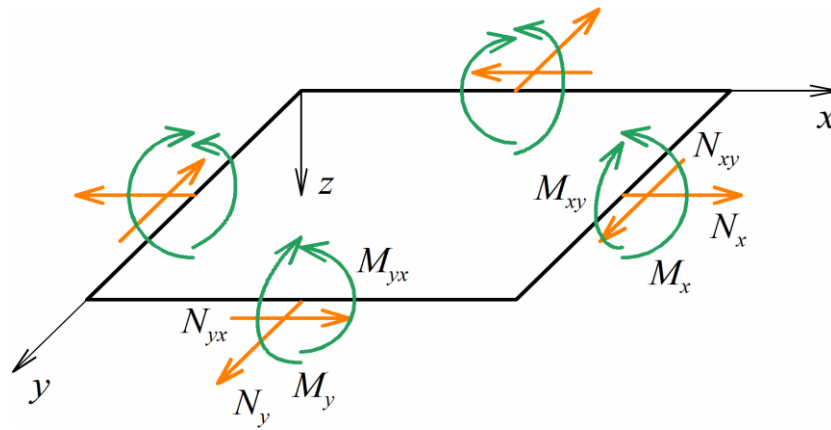


Figura 2 Esforços considerados pela Teoria Clássica dos Laminados. O referencial está no plano médio da placa e o eixo z na direcção da espessura.

Notar que a convenção usada é tal que [Moura e outros, 2005]:

- o índice do esforço é do eixo perpendicular à face em que atua;
- os esforços são expressos por unidade de largura da face em que atuam, sendo agrupados nos vetores $N = \{N_x \ N_y \ N_{xy}\}^T$ e $M = \{M_x \ M_y \ M_{xy}\}^T$, dados por

$$N = \int \sigma dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \sigma'_k dz \right\} \quad (1.1)$$

$$M = \int \sigma z dz = \sum_{k=1}^n \left\{ \sigma'_k z dz \right\} \quad (1.2)$$

em função das tensões $\sigma'_k = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}_k^T$ em cada camada k . Por sua vez, estas calculam-se a partir das deformações do laminado

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + z\kappa \quad (1.3)$$

onde se considera o vetor de deformações membrana $\varepsilon_0 = \{\varepsilon_{0x} \quad \varepsilon_{0y} \quad \gamma_{0,xy}\}^t$ e o vetor de curvaturas $\kappa = \{\kappa_x \quad \kappa_y \quad \kappa_{xy}\}^t$, e da matriz de rigidez \mathbf{Q}'_k de cada camada k expressa no referencial global do laminado $\{xyz\}$,

$$\sigma'_k = \mathbf{Q}'_k \{\varepsilon_0 + z\kappa\} \quad (1.4)$$

Obtém-se assim a forma matricial da TCL,

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad (1.5)$$

na qual intervêm a matriz de rigidez de membrana

$$\mathbf{A} = \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}'_k (z_k - z_{k-1}) \quad (1.6)$$

a matriz de acoplamento membrana-flexão

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}'_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (1.7)$$

e a matriz de rigidez de flexão

$$\mathbf{D} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \mathbf{Q}'_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (1.8)$$

em que a camada k é delimitada pelas coordenadas $z_{k-1} \leq z \leq z_k$. A relação (1.5) pode ser invertida,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{b} & \mathbf{d} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

sendo

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{b} \\ \mathbf{b} & \mathbf{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1.10)$$

Finalmente, a matriz de rigidez \mathbf{Q}' de cada camada expressa no referencial $\{xyz\}$ é obtida a partir da matriz de rigidez \mathbf{Q} no referencial principal $\{123\}$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Onde

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} & Q_{12} &= \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1} & Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Para tal aplica-se uma operação de rotação de referencial (figura 3), da qual resultam

$$\begin{aligned} Q'_{11} &= c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ Q'_{12} &= c^2 s^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (c^4 + s^4) Q_{12} \\ Q'_{16} &= c^3 s (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) + c s^3 (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \\ Q'_{22} &= s^4 Q_{11} + c^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) \\ Q'_{26} &= c s^3 (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) + c^3 s (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \\ Q'_{66} &= c^2 s^2 [Q_{11} + Q_{22} - 2(Q_{12} + Q_{66})] + (c^4 + s^4) Q_{66} \end{aligned} \quad (1.13)$$

sendo $c = \cos \theta$ e $s = \sin \theta$.

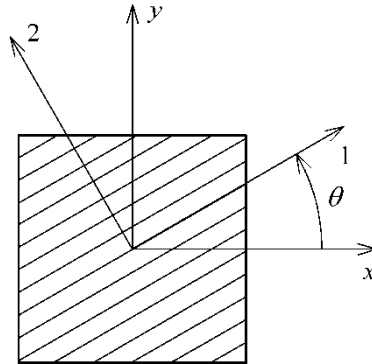


Figura 3 Rotação de referencial $\{xyz\}$ para $\{123\}$ [Moura e outros, 2005].

Portanto, depois de calculadas as deformações a partir dos esforços (1.9), podem-se obter as tensões (1.4) no referencial do laminado e depois as tensões no referencial principal

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.14)$$

que devem ser comparadas com as resistências das camadas através de critérios de rotura.

É também interessante comparar os módulos de tração e de flexão previstos pela TCL,

$$E_x = \frac{1}{ha_{11}} \quad E_{fx} = \frac{12}{h^3 d_{11}} \quad (1.15)$$

com os valores experimentais.

1.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

A resistência à compressão longitudinal é uma das propriedades mais importantes da camada [Gibson, 2007; Hodgkinson, 2000]. Em princípio, deveria ser medida através de ensaios de laminados unidireccionais $[0]_n$. Todavia, a forte tendência para a encurvadura exige que o comprimento livre dos provetes seja bastante pequeno, geralmente menor do que 13 mm [Moura e outros, 2005; Hodgkinson 2000]. Isto acentua a influência dos efeitos de transmissão de carga (St. Venant) e provoca frequentemente rutura próxima aos insertos colados [Moura e outros, 2005;]. Apesar destas limitações, foram desenvolvidos e normalizados vários métodos de ensaio que fazem apelo a dispositivos especiais para garantir o alinhamento do provete [Hodgkinson, 2000]. Estes métodos podem classificar-se quanto à forma de transmitir a carga para o provete (figura 4).

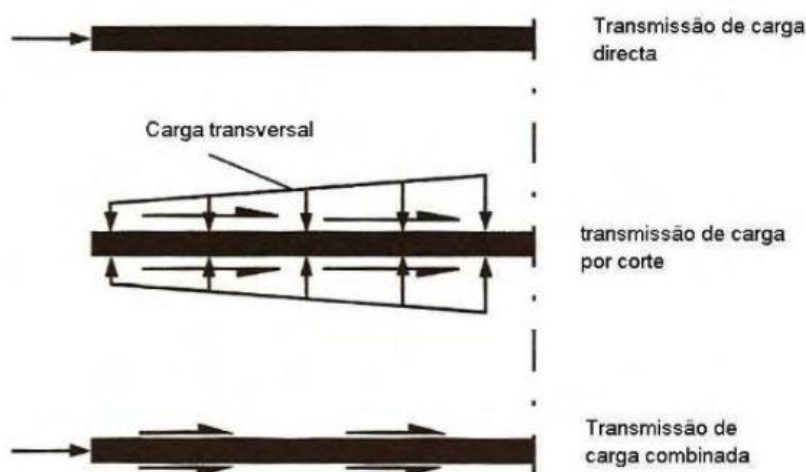


Figura 4 Formas de transmissão carga em ensaios compressão [Hodgkinson, 2000].

A transmissão de carga direta nos topos foi implementada no ensaio denominado por

ASTM D695 modificado [Gibson, 2007; Adams, 2005] (figura 5) por ter resultado da adaptação de um ensaio de plásticos não reforçados. De salientar a utilização de guias anti-encurvadura. Este ensaio revelou-se inadequado para laminados $[0]_n$ pois origina fissuras transversais que se estendem dos topos até ao centro.

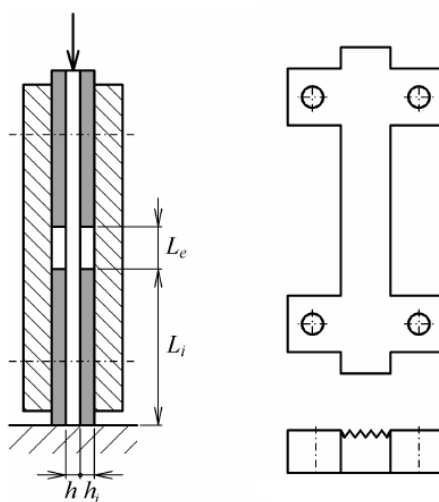


Figura 5 Representação esquemática do ensaio ASTM D695 modificado para laminados $[0]_n$ [Moura e outros, 2005]

A transmissão de carga por corte foi implementada na norma ASTM D3410 [Adams, 2005; Moura e outros, 2005;], que define o dispositivo IITRI (*Illinois Institute of Technology Research Institute*) (figura 6). É importante referir que este dispositivo necessita de tolerâncias apertadas para garantir o alinhamento correto do provete [Wegner e Adams, 2000; Lackey, 2009].

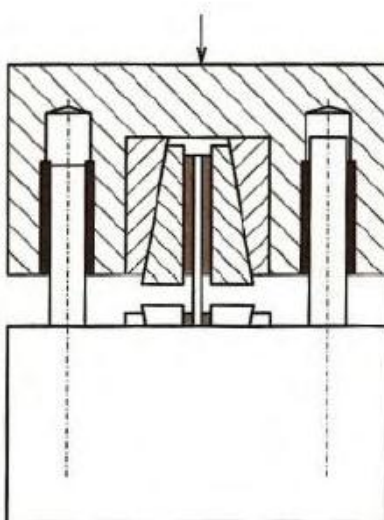


Figura 6 Dispositivo IITRI [Moura e outros, 2005].

Mais recentemente surgiu o ensaio de transmissão de carga combinada da norma ASTM D6641 [Adams, 2005; Wegner e Adams, 2000] (figura 7), designado por *Combined Loading Compression* (CLC). Em relação aos anteriores, este método apresenta algumas vantagens, entre elas a menor complexidade do dispositivo, o facto de não ser obrigatória a utilização de insertos colados ao provete e de ser possível ajustar a proporção das forças de compressão e de corte no sentido de obter melhores resultados [Gibson, 2007; Adams, 2005].

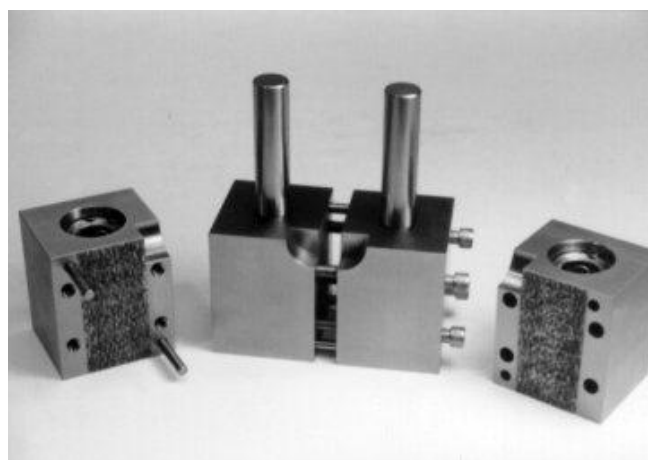
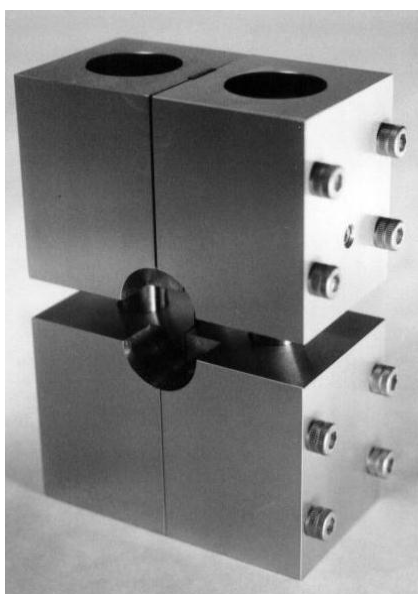


Figura 7 Dispositivo de ensaio CLC [Adams,2005].

Não obstante, face às dificuldades inerentes aos provetes unidirecionais $[0]_n$, têm-se usado laminados cruzados tipo $[0/90]$, sendo a resistência à compressão longitudinal da camada calculada a partir da TCL. [Adams, 2005; Wegner e Adams, 2000]

Finalmente, merece referência o método de ensaios à compressão desenvolvido por Neves (2009), que se baseia na compressão direta de um provete híbrido (Figura 8), em que o laminado está envolvido por camadas de resina e entre topos metálicos.

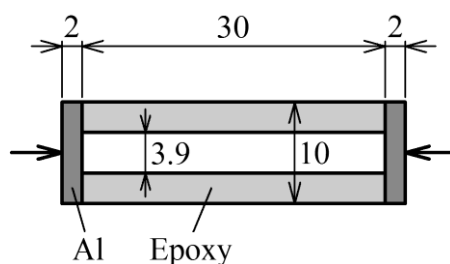


Figura 8 Representação do provete híbrido proposto por Neves (2009) [Neves e outros, 2011].

Neste provete as camadas de resina epóxida têm por objetivo evitar encurvadura, enquanto os topos de alumínio se destinam a evitar o esmagamento do laminado. A curva tensão-deformação do laminado é obtida da do provete descontando a curva tensão-deformação da resina, previamente medida em ensaios à parte. Neves (2009) aplicou este conceito a provetes híbridos constituídos por laminados de tecido de fibra de vidro/epóxido, tendo obtido bons resultados para o módulo e tensões de rotura, com dispersões relativamente baixas e modos de rotura válidos [Neves, 2009; Neves e outros, 2011].

1.4 ENSAIOS DE FLEXÃO

Nos ensaios de flexão atingem-se tensões de compressão e de tração nas superfícies dos provetes. Logo, seriam à partida uma solução para medir a menor das resistências longitudinais da camada mediante ensaios de provete $[0]_n$. Porém, devido ao estado de tensão no provete não ser uniforme e por haver uma elevada sensibilidade dos resultados finais a ligeiras variações nas dimensões dos provetes, os ensaios de flexão não possibilitam a obtenção de valores utilizáveis no projeto [Hodgkinson, 2000]. Não

obstante, a facilidade de execução e a simplicidade dos equipamentos e dos procedimentos necessários fazem com que os ensaios de flexão sejam bastante usados em controlo de qualidade. As variantes do ensaio de flexão designam-se por flexão em 3 pontos (figura 9) e flexão em 4 pontos (figura 10), conforme o número total de suportes e de pontos de carregamento. Embora o volume de material sujeito às tensões máximas seja maior no ensaio de flexão de 4 pontos, o ensaio de flexão em 3 pontos é mais simples e é considerado suficiente para controlo de qualidade.

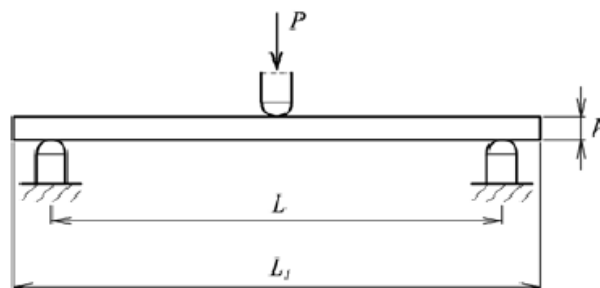


Figura 9 Representação esquemática de um ensaio à flexão em 3 pontos [Moura e outros, 2005].

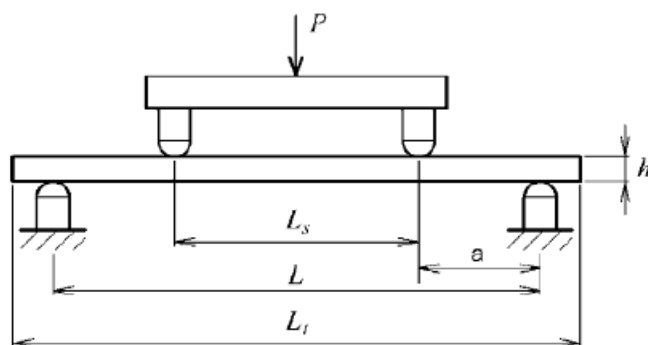


Figura 10 Representação esquemática de um ensaio à flexão em 4 pontos [Moura e outros, 2005].

Há, contudo, outra abordagem que permite ultrapassar os problemas acima referidos recorrendo a provetes *sandwich*. De facto, a norma ASTM D5467 [Adams, 2005] descreve um ensaio de flexão em 4 pontos (figura 11) de um provete *sandwich* constituído por 3 camadas: a pele superior que é o laminado $[0]_n$ do compósito em estudo, o núcleo em ninho de abelha metálico que permite evitar a rutura precoce por encurvadura da pele superior e ainda, a pele inferior que é em chapa metálica com espessura suficiente para garantir a rutura da pele superior [Moura e outros, 2005]. A principal desvantagem

deste ensaio é o elevado custo do provete.

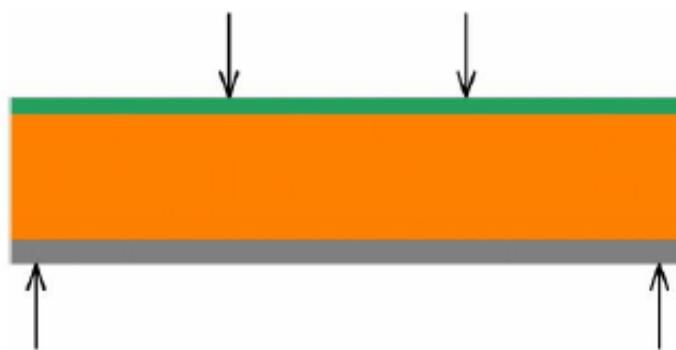


Figura 11 Esquema ilustrativo de um ensaio de flexão em 4 pontos com um provete *sandwich*.

1.5 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho foi dar um contributo para o estado do conhecimento relativo à medição da resistência à compressão longitudinal da camada recorrendo principalmente ao ensaio de provetes híbridos desenvolvido por Neves (2009). Em particular, procurou-se aplicar este método a laminados de fibra de carbono que, à partida, colocavam maiores dificuldades devido às maiores resistências. Tal como na maioria dos estudos já publicados, usaram-se neste estudo laminados unidireccionais e cruzados. Em paralelo com os ensaios de compressão, realizaram-se também ensaios de flexão em 4 pontos que permitem obter compressão em algumas zonas dos provetes.

Capítulo 2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O material escolhido para este trabalho foi um compósito carbono/epóxico produzido a partir do pré-impregnado HS160REM fornecido pela empresa Seal. As propriedades da camada no plano são dadas na tabela 1. Notar que a resistência σ_{uf1} foi medida em ensaios de flexão de provetes unidirecionais, tendo sido observado que os provetes de flexão em 4 pontos sofriam rotura à compressão.

Tabela 1 Propriedades da camada do carbono/epóxico usado. A espessura nominal da camada é 0.15 mm [Morais e Pereira, 2007; Fernandes, 2011]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	σ_{ut1} (MPa)	σ_{ut2} (MPa)	σ_{uf1} (MPa)
130	8.2	4.1	0.27	2100	61	1300

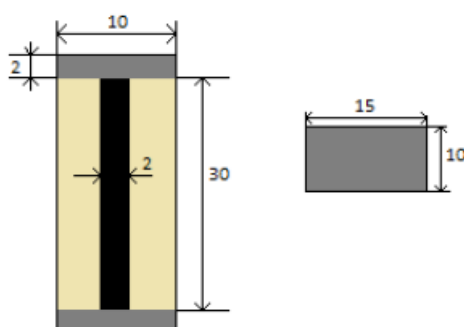
A escolha dos laminados para este estudo teve em conta as propriedades da camada, em particular, a hipótese de que $\sigma_{uc1} \approx \sigma_{ut1}$, a revisão bibliográfica, e também a capacidade de 50 kN da máquina de ensaios disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Os laminados escolhidos são definidos na tabela 2. Refira-se que os laminados cruzados foram já usados em trabalhos prévios [Fernandes, 2011], estando disponíveis resistências à tração e flexão que são adiante usadas como base de comparação. Estes laminados permitem avaliar o efeito das camadas a 90° na medição da resistência à compressão longitudinal.

Tabela 2 Laminados usados neste trabalho

Designação	Empilhamento	Espessura nominal h (mm)
U90	$[90]_{28}$	4.2
C1	$[(0/90)_6/0]$	2.0
C2	$[(0/90_2)_4/0]$	2.0
C3	$[(0/90_3)_3/0]$	2.0

Os provetes compósitos foram obtidos de placas laminadas no Instituto de Engenharia e Gestão Industrial (INEGI) com as sequências empilhamento definidas na tabela 2. As placas foram produzidas por prensagem a quente, tendo depois sido delas cortados os provetes por jato de água e por disco de corte com a geometria desejada.

Os provetes U90 para ensaios de compressão tinham largura $b = 20$ mm e comprimentos $L = 20$ e 25 mm. Por seu turno, os provetes híbridos (figura 12) com laminados C1, C2 e C3 foram obtidos vazando o adesivo de reforço num molde previamente construído [Neves, 2009] onde estavam pré-posicionados o laminado e os insertos de aço inox AISI 304. A cura do adesivo foi efetuada em forno a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas.

**Figura 12** Proвете híbrido para ensaios de compressão com as dimensões em mm.

No que diz respeito à preparação de provetes híbridos, adotou-se a mesma metodologia usada anteriormente [Neves, 2009] que tinha como objetivo alcançar um estado de tensão uniforme num volume apreciável do provete, evitando a rutura prematura do provete por encurvadura. Numa fase inicial, optou-se por efectuar a colagem com Araldit standard dos topos de aço inox ao laminado posicionando o conjunto em “I” (figura 13). Para

isso o laminado foi apoiado em duas chapas de alumínio com espessura de 2mm para garantir que ficasse em posição central. Durante a colagem aplicou-se compressão nos topos através de duas peças de faces maquinadas.

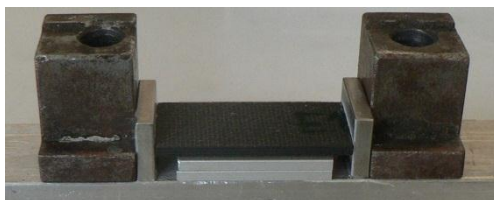


Figura 13 Fase inicial da elaboração do provete híbrido, perfil em I.

Posteriormente, procedeu-se à colocação dos conjuntos “I” num molde (figura 14) para preencher com Araldit Standard, cujo papel principal era evitar encurvadura prematura (figura 15). Procurou-se também evitar o esmagamento local do compósito através da pré-colagem dos topos com Araldit. Por fim, a cura foi feita em forno como já foi referido.

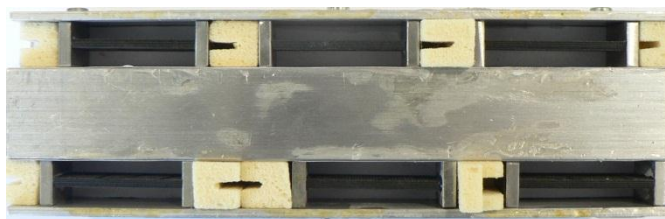


Figura 14 Colocação dos perfis em I no molde para vazamento da Araldit Standard.



Figura 15 Vazamento da Araldit Standard.

Os ensaios foram realizados numa máquina ShimadzuTM AG-50KNG (figura 16), tendo os deslocamentos sido medidos pelo videoextensómetro Messphysic ME 46 NG. Nos ensaios de compressão usou-se a célula de carga de 50 kN e a velocidade imposta de 1 mm/min. Aplicou-se compressão direta nos topos quer os provetes unidireccionais U90 quer os provetes híbridos. A distância média entre as marcas ópticas coladas (figura 17) está definida na tabela 3.

Tabela 3 Distância média entre as marcas ópticas.

Designação	Distância extensométrica L_e (mm)
U90 1*	10
U90 2*	15
C1	20
C2	20
C3	20

Realizaram-se ensaios de laminados unidireccionais com diferentes comprimentos: U90 1* com 20mm e U90 2* com 25mm.



Figura 16 Fotografia de um ensaio de compressão.

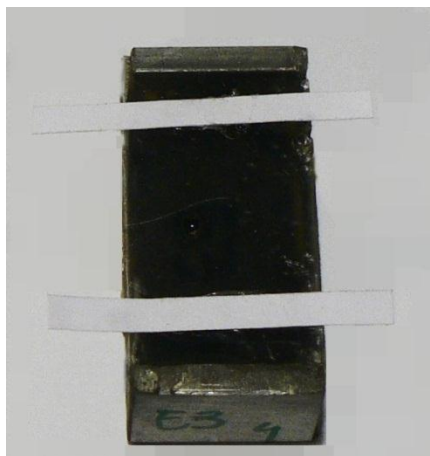


Figura 17 Fotografia de provete híbrido com as marcas ópticas coladas.

Os provetes para ensaios de flexão em 4 pontos tiveram largura $b = 15$ mm e um comprimento total $L_p = 80$ mm (figura 18), compatível com as distâncias entre pontos de carregamento $L_s = 20$ mm e vão $L = 60$ mm.

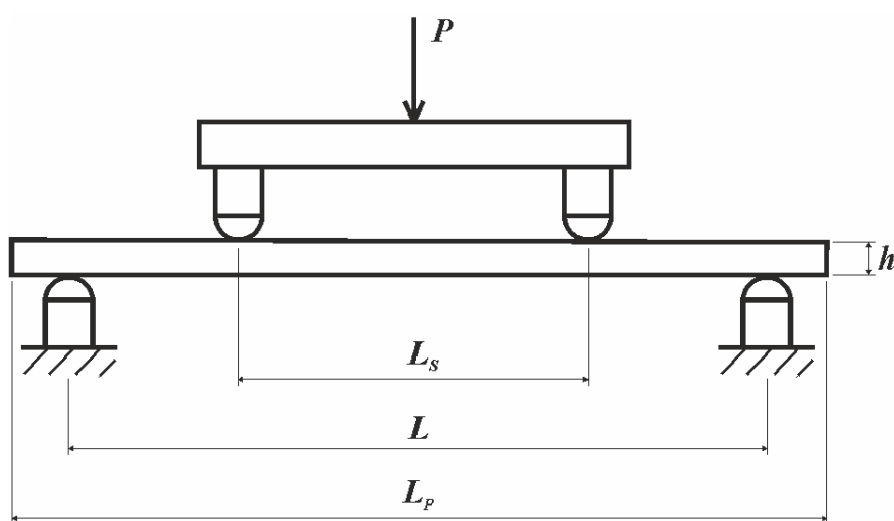


Figura 18 Representação esquemática da configuração do ensaio de flexão em 4 pontos [Fernandes, 2011].

Nos ensaios de flexão (figura 19) usaram-se roletes de Politetrafluoretileno (PTFE) em detrimento dos habituais roletes metálicos. O objetivo foi diminuir as tensões de esmagamento local que se considerou terem um papel relevante na rotura por encurvadura com delaminação das camadas a 0° dos laminados C1, C2 e C3 observada num trabalho anterior [Fernandes, 2011]. A velocidade imposta para estes ensaios foi de 2mm/min e usou-se a mesma célula de carga que nos ensaios à compressão, ou seja, 50kN.



Figura 19 Fotografia do mecanismo para ensaio à flexão em 4 pontos.

Durante os ensaios mediu-se o deslocamento máximo conforme a representação da figura 20.

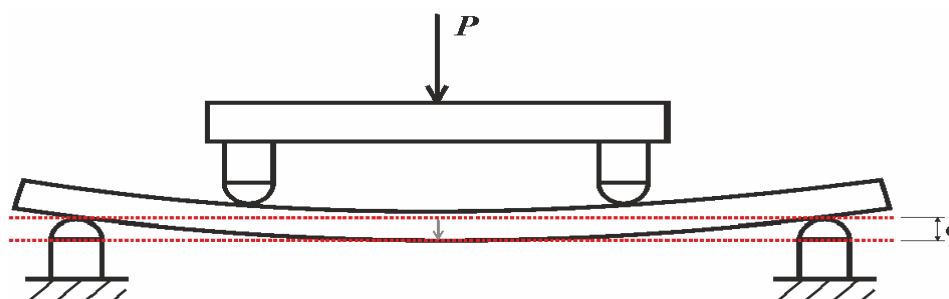


Figura 20 Representação esquemática da medição de deslocamentos no ensaio de flexão em 4 pontos [Fernandes, 2011].

Capítulo 3 **TRATAMENTO DE DADOS**

Nos ensaios de compressão dos provetes U90 obteve-se para cada provete um ficheiro de dados com vários pontos de carga e de comprimento das marcas extensométricas. O tratamento de dados consistiu essencialmente em converter esse conjunto de pontos em curvas tensão-deformação. Porém, notou-se nas curvas tensão-deformação uma fase inicial de acomodação de carga no provete (figura 21) que se deveu provavelmente a ligeiros desvios de perpendicularidade. Analiticamente, os dados referentes a esta zona foram ignorados e procedeu-se à substituição dos mesmos através da extrapolação de uma reta de regressão linear relativa aos dados posteriores.

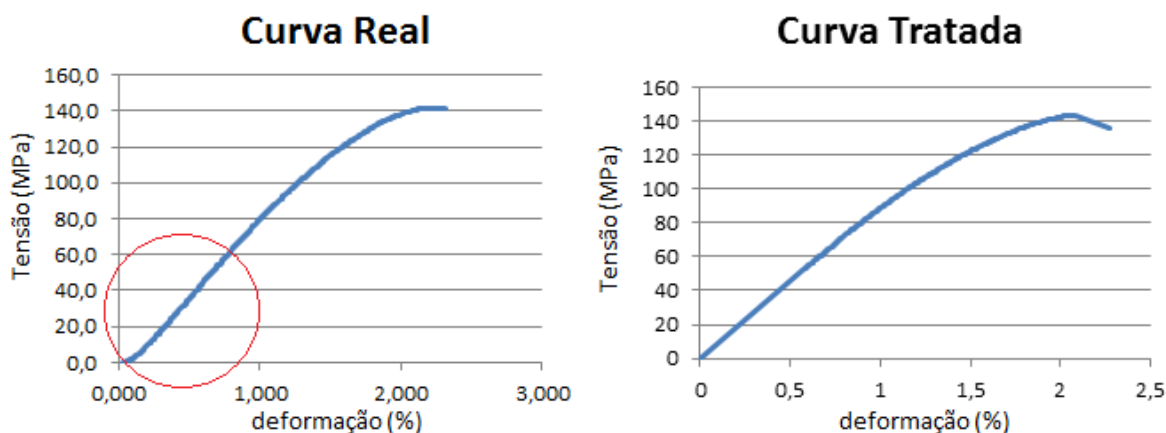


Figura 21 Comparação entre as curvas tensão-deformação à compressão: curva real e curva após o tratamento de dados acima descrito.

Relativamente aos provetes híbridos, depois do tratamento das curvas acima referido foi

necessário obter a curva tensão-deformação do compósito em estudo subtraindo à tensão do provete a contribuição das camadas de Araldit. Para isso utilizou-se uma lei das misturas (3.1)

$$\sigma_{compósito} = \frac{\sigma_{provete} - (1 - \nu_{compósito}) \cdot \sigma_{Araldit}}{\nu_{compósito}} \quad (3.1)$$

função da fração volúmica do compósito e da tensão na Araldit, cuja curva tensão-deformação foi previamente medida por Faria (2010). Seguidamente, estimou-se a tensão de rotura à compressão das camadas a 0° através da TCL. Na realidade, verificou-se que esta podia ser estimada com bastante rigor usando simplesmente

$$\sigma_{ucl} \approx \frac{E_1}{E} \sigma_u \quad (3.2)$$

sendo E e σ_u o módulo e a tensão de rotura do laminado.

Quanto aos ensaios de flexão, para além do tratamento das curvas carga-deslocamento análogo ao ilustrado na Figura 21, calcularam-se o módulo e a tensão de rotura segundo as expressões para $L_s = L/3$ (Figura 18), respetivamente [Hodgkinson, 2000]

$$E_f = \frac{0.21m_0L^3}{bh^3} \quad (3.3)$$

$$\sigma_f = \frac{PL}{bh^2} \quad (3.4)$$

sendo m_0 a rigidez inicial. Posteriormente, usando o momento fletor no momento da rotura, calculou-se através da TCL uma estimativa da tensão de rotura longitudinal de compressão da camada.

Capítulo 4 **RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

4.1 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE PROVETES [90°]

As figuras 22 e 23 mostram curvas tensão-deformação de provetes U90 com comprimentos de 20 e 25 mm, respetivamente, enquanto que a tabela 4 resume os principais resultados: módulo, tensão de rotura e deformação correspondente.

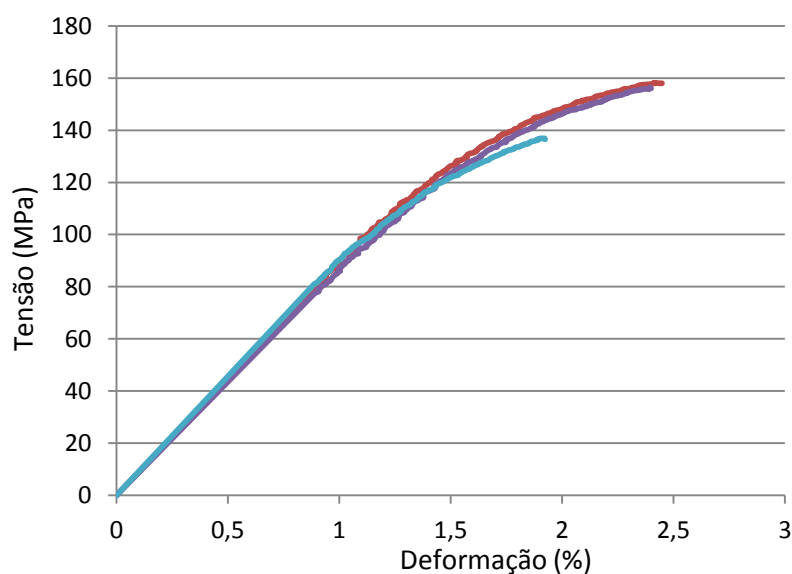


Figura 22 Curvas tensão-deformação típicas dos laminados fibra de carbono com comprimento de 20mm.

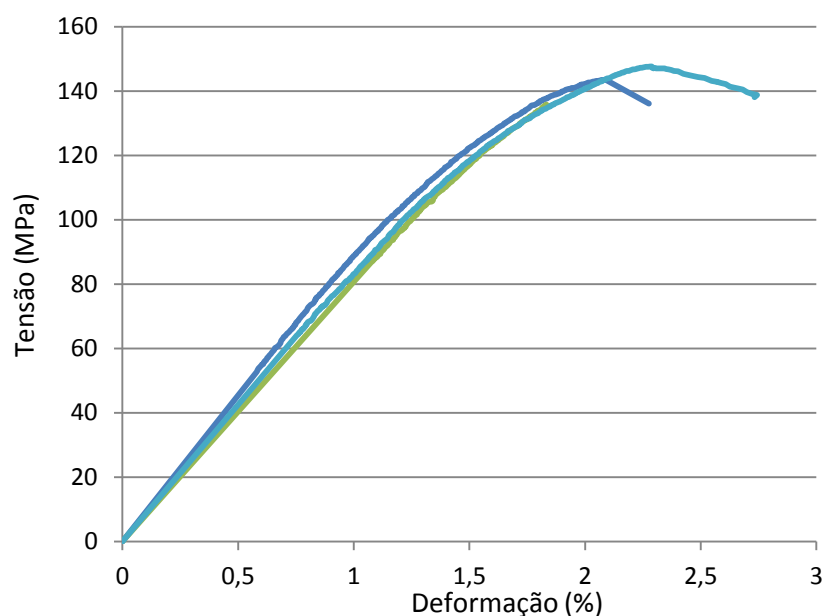


Figura 23 Curvas tensão-deformação típicas dos laminados fibra de carbono com comprimento de 25mm.

Tabela 4 Resultados dos ensaios de compressão dos laminados U90

Provetes	E_2 (GPa)	σ_{uc2} (MPa)	ϵ_{uc2} (%)
L20-#1	9.009	158.125	2.422
L20-#2	8.800	156.406	2.394
L20-#3	9.106	136.875	1.920
L25-#1	9.104	143.594	2.087
L25-#2	8.512	150.313	2.725
L25-#3	8.463	147.656	2.288
Média	8.832	148.828	2.306
Desvio Padrão (%)	3.280	5.356	12.176

Os valores apresentados na tabela 4 têm dispersão relativamente baixa e são claramente realistas para este tipo de material [Gibson, 2007; Hodgkinson, 2000]. De facto, os módulos são até ligeiramente superiores aos medidos anteriormente noutros tipos de ensaio (tabela 1).

Os provetes ensaiados apresentaram geralmente uma superfície de fratura inclinada, que é frequentemente observada em ensaios de compressão [Schurmann e Puck, 2002], por vezes acompanhada de delaminação (figuras 24 e 25). O comprimento dos provetes não influenciou os modos de rotura. Estas observações reforçam a validade do método de ensaio empregue.

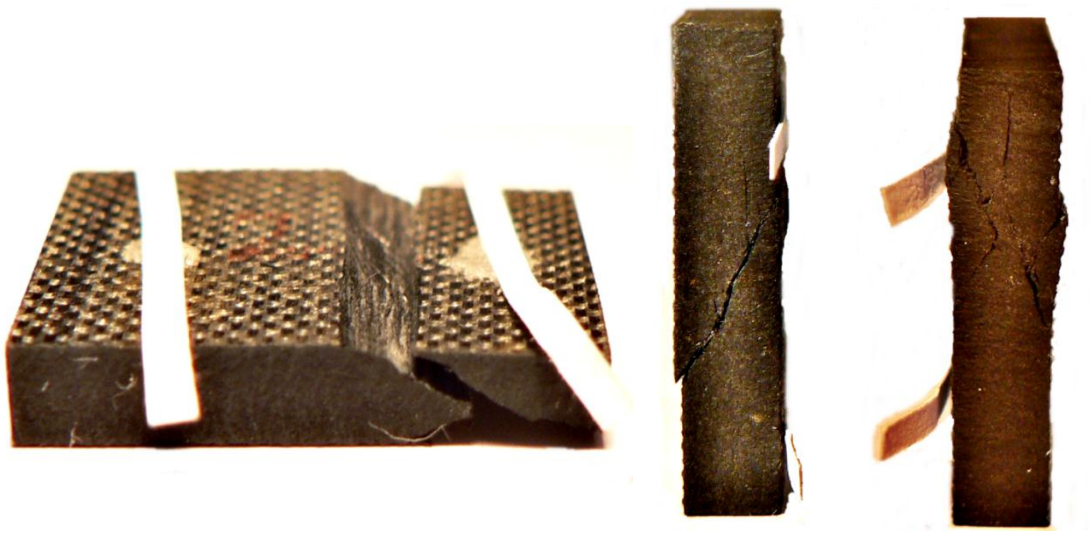


Figura 24 Fotografias dos provetes U90 com comprimento 20mm onde são visíveis fissuras inclinadas e delaminações.



Figura 25 Fotografias dos provetes U90 com comprimento 25mm onde são visíveis fissuras inclinadas e delaminagens.

4.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DE PROVETES HÍBRIDOS

As figuras 26 a 28 mostram curvas tensão-deformação de provetes híbridos dos laminados C1 a C3, onde é notório um comportamento bastante não linear. Isto pode explicar-se pela não-linearidade do comportamento da Araldit e, em menor grau, das camadas a 90°, para além de possíveis desalinhamentos que estarão na base das irregularidades das curvas.

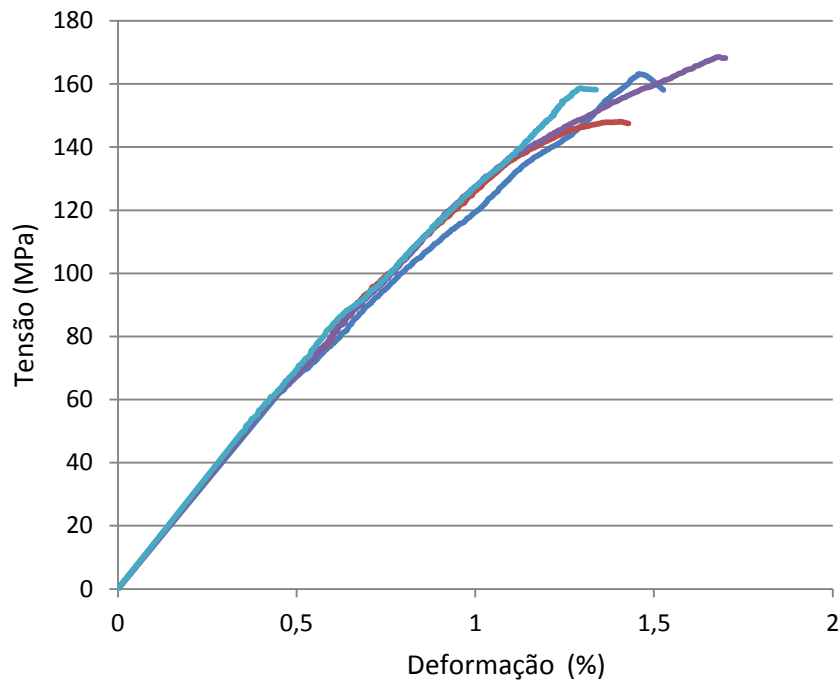


Figura 26 Curvas tensão-deformação típicas de laminados C1= $[(0/90)_6/0]$

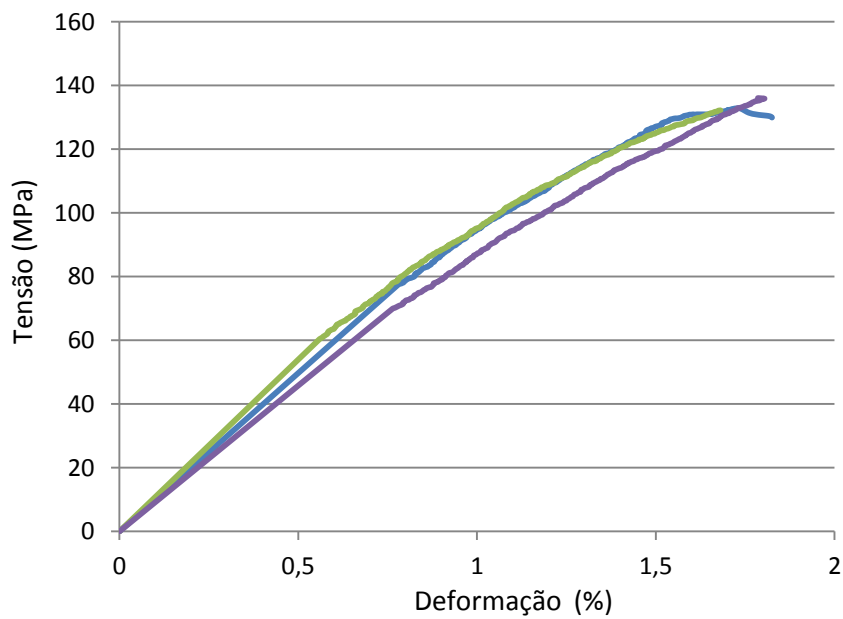


Figura 27 Curvas tensão-deformação típicas de laminados C2= $[(0/90)_4/0]$

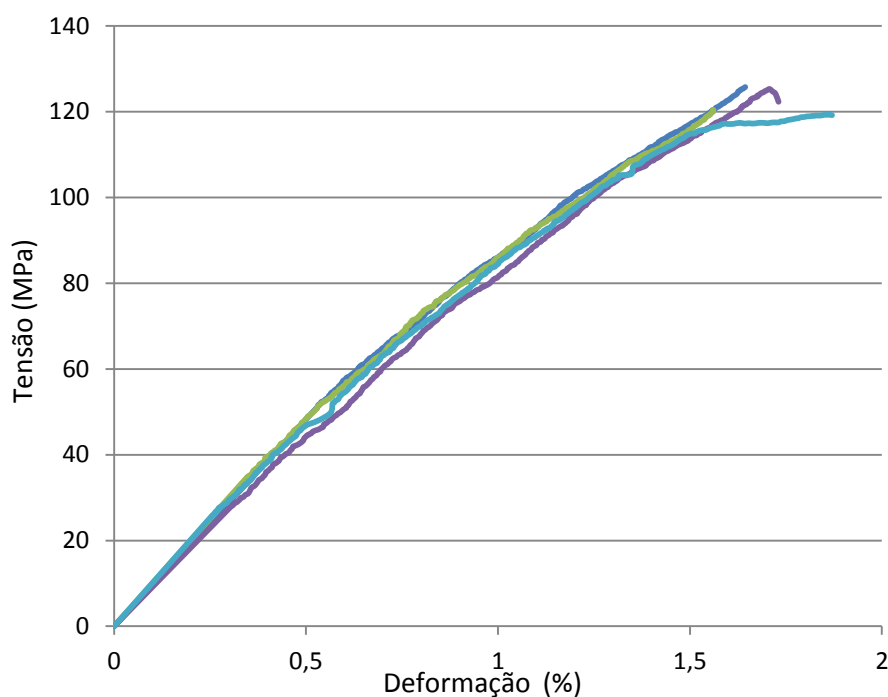


Figura 28 Curvas tensão-deformação típicas de laminados C3 = $[(0/90_3)_3/0]$

As figuras 29 a 31 resumem os principais resultados: módulo, tensão de rotura calculada para o laminado e deformação correspondente. Obviamente, os módulos e a tensão de rotura variam de laminado para laminado consoante o número de camadas a 0° . Porém, nota-se que os módulos ficaram algo aquém das previsões da TCL, ao contrário do que tinha sucedido em ensaios de tração no trabalho de Fernandes (2011). Isto reforça ideia do efeito de desalinhamentos já referido.

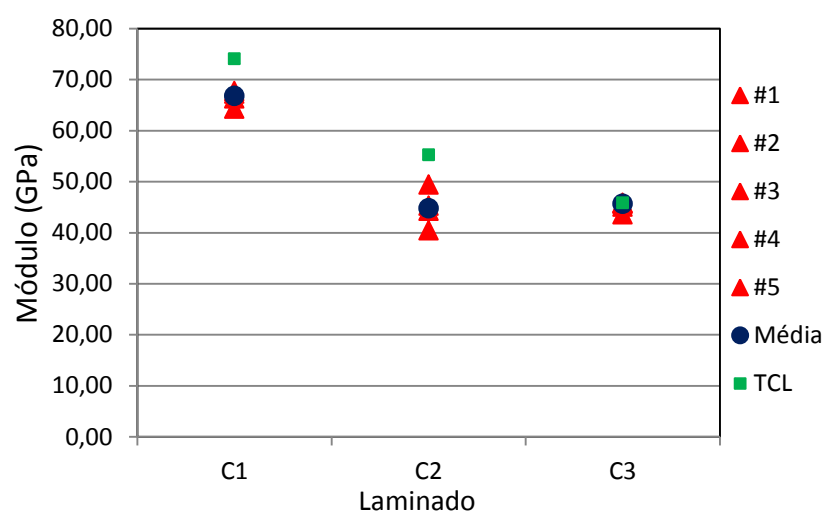


Figura 29 Módulo de elasticidade medido para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL. Os desvios padrão foram de 2,06% para C1, 8,21% para C2 e 2,30% para C3.

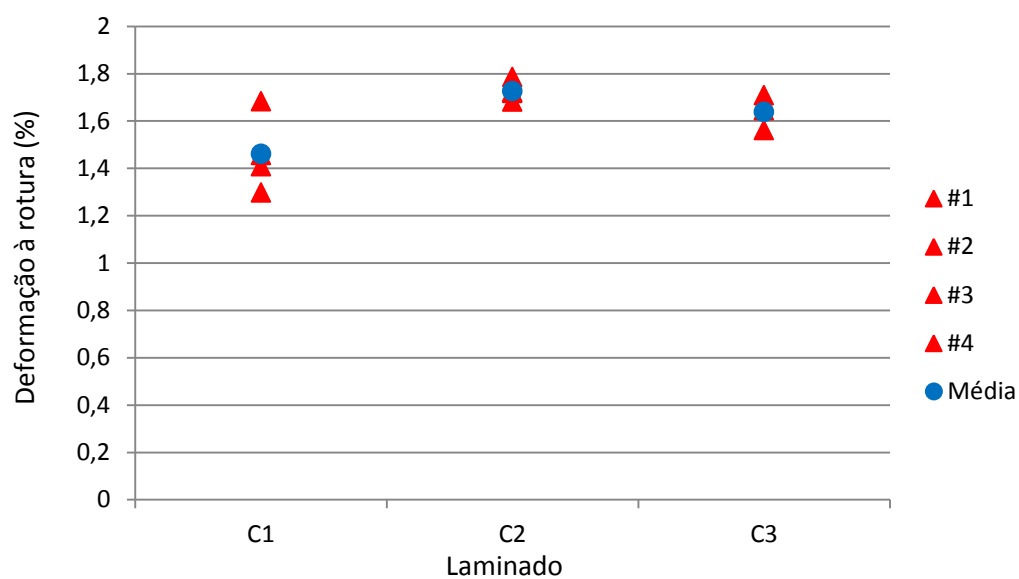


Figura 30 Deformações de rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 11,11% para C1, 2,52% para C2 e 4,53% para C3.

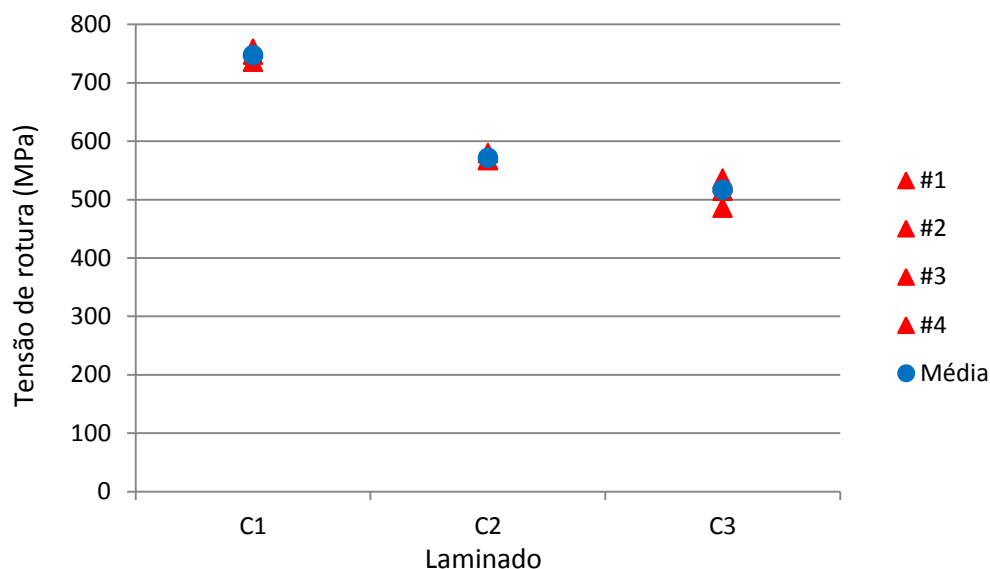


Figura 31 Tensões de rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 1,50% para C1, 1,25% para C2 e 4,31% para C3.

Finalmente, recorreu-se à equação (3.2) para obter estimativas da tensão de rotura longitudinal da camada. Como foi referido, os módulos dos laminados ficaram geralmente aquém das previsões da TCL (Figura 30) com as propriedades nominais (tabela 1). Todavia, como o módulo do laminado depende sobretudo das camadas a 0° , pode-se admitir que o rácio E_1/E é igual ao nominal. Os resultados da Figura 32 mostram tensões de rotura relativamente baixas, semelhantes às tensões de rotura à flexão medidas em trabalhos anteriores (tabela 1).

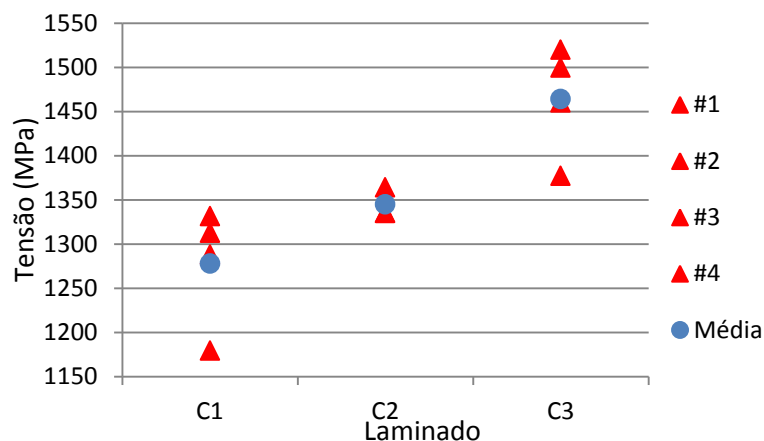


Figura 32 Estimativas da tensão de rotura longitudinal da camada em cada laminado. Os desvios padrão foram de 5,32% para C1, 1,25% para C2 e 4,31% para C3.

Após a realização dos ensaios de compressão verificou-se que tinham ocorrido três modos de rotura característicos: rotura segundo uma direção oblíqua, esmagamento nos topos e delaminação (figuras 33 a 37). Esta variabilidade dos modos de rotura confirma os problemas na preparação indicados pelos valores medidos para os módulos e tensões de rotura.

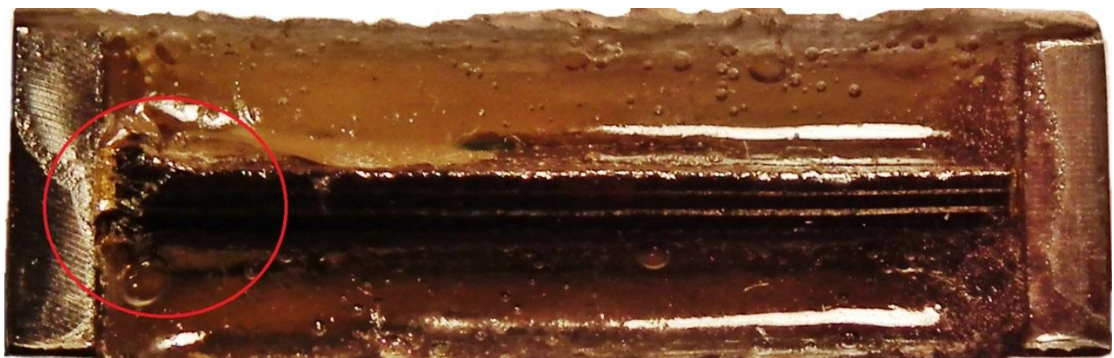


Figura 33 Fotografia de provete híbrido do laminado C3 = [(0/90₃)₃/0] após ensaio com esmagamento nos topos visível.

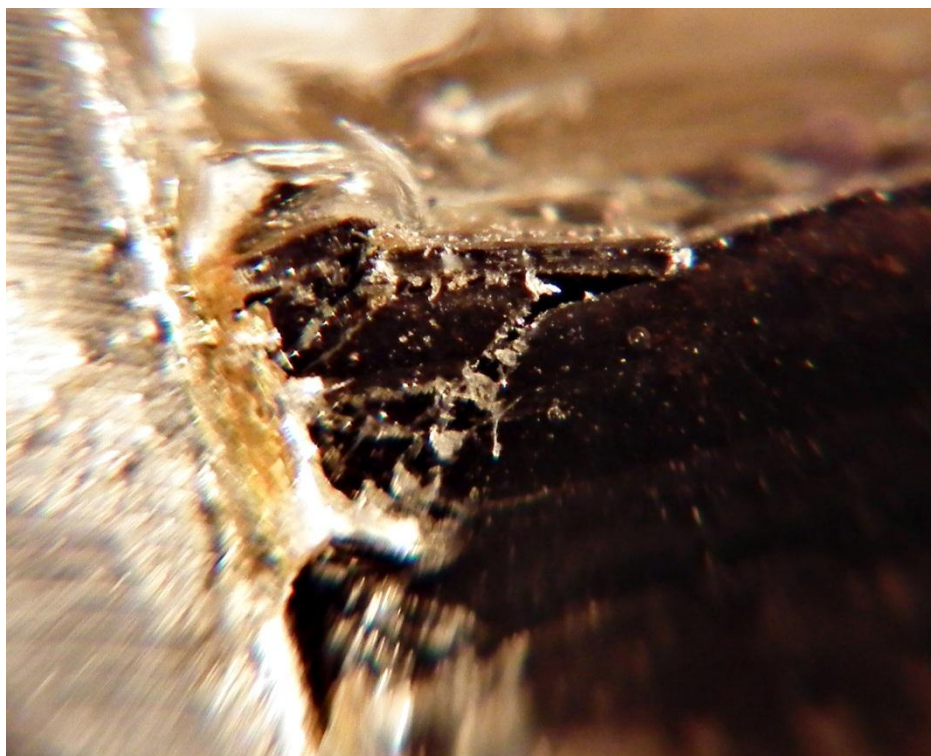


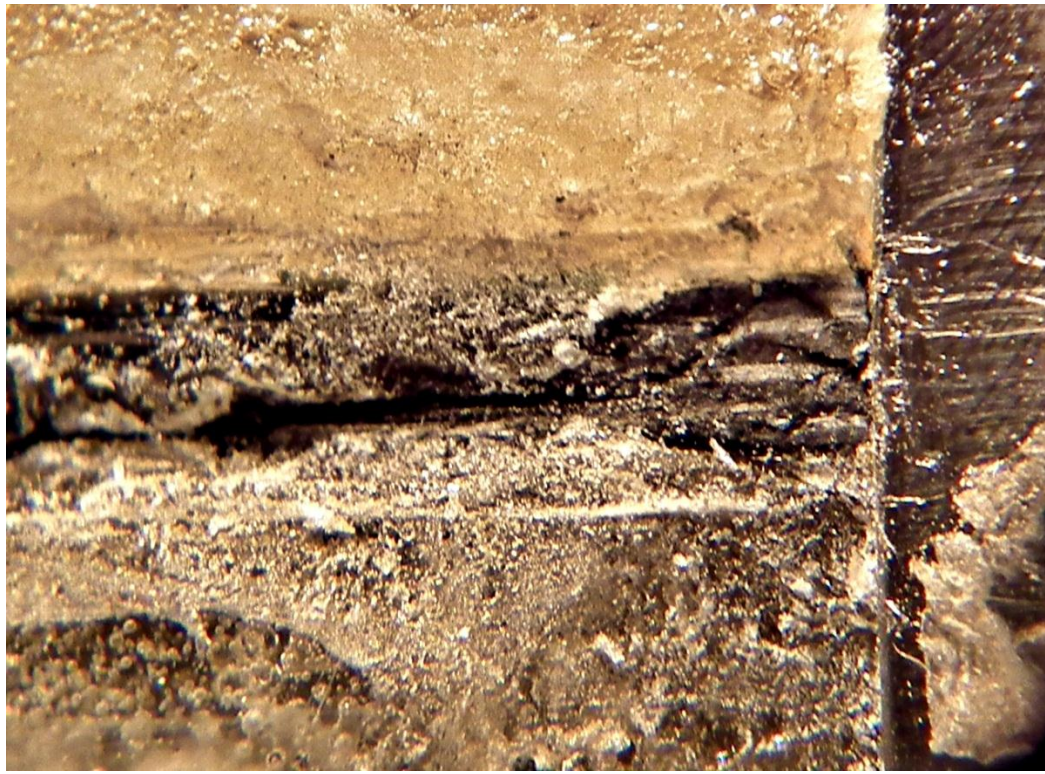
Figura 34 Ampliação da zona de rotura à compressão de provete híbrido do laminado C3 = $[(0/90_3)_3/0]$.

Para visualização do modo de rotura em alguns provetes híbridos foi necessário efectuar ligeiros cortes da Araldit Standard nas zonas de rotura.



Figura 35 Fotografia de provete híbrido do laminado C3 = $[(0/90_3)_3/0]$ após ensaio em que é visível a rotura segundo direção oblíqua.

Posteriormente, verificou-se que era possível ver mais do que um modo de rotura num mesmo provete (figura 36 e 37).



(a)

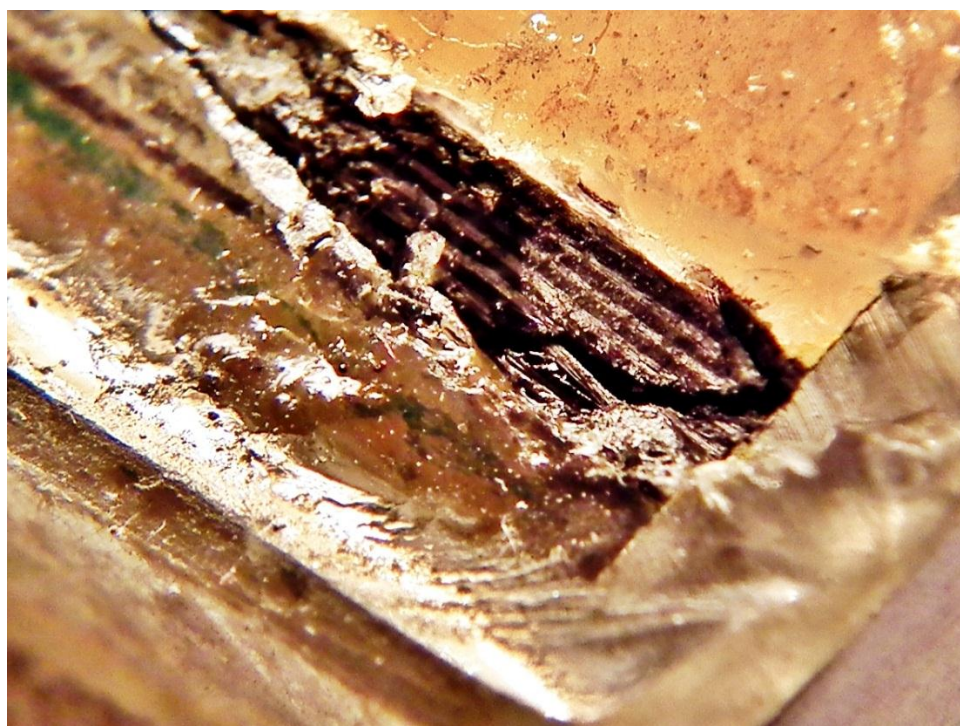


(b)

Figura 36 Fotografias de provete híbrido à compressão do laminado C2 = $[(0/90_2)_4/0]$ após ensaio: (a) esmagamento nos topos e delaminação (b) rotura segundo direção oblíqua e delaminação.



(a)



(b)

Figura 37 Fotografias de provete híbrido à compressão do laminado C1 = $[(0/90)_6/0]$ após ensaio: (a) esmagamento nos topos e delaminação (b) esmagamento nos topos.

4.3 ENSAIOS DE FLEXÃO

As figuras 38 a 40 apresentam curvas carga-deslocamento típicas dos provetes C1=[(0/90)6/0], C2 = [(0/90₂)4/0] e C3 = [(0/90₃)3/0].

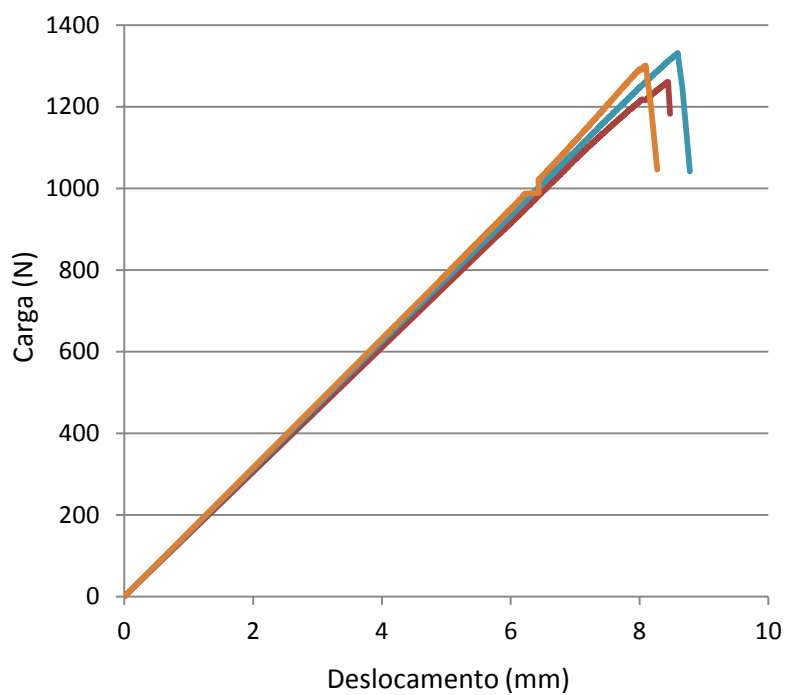


Figura 38 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C1 = [(0/90)6/0].

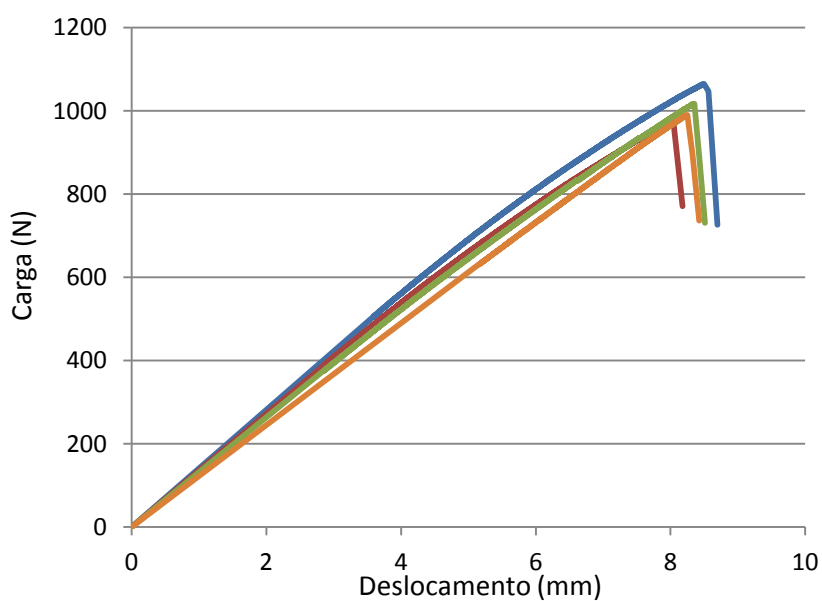


Figura 39 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C2 = [(0/90₂)4/0].

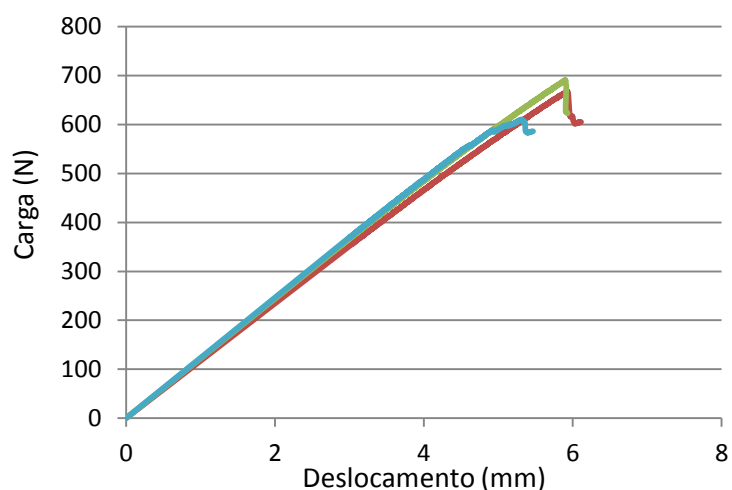


Figura 40 Curvas carga-deslocamento típicas de laminados C3 = $[(0/90_3)_3/0]$.

Durante a realização dos ensaios verificou-se que o modo de rotura foi a encurvadura com delaminação da camada superficial a 0° do laminado sujeita a compressão (figuras 41 a 44). Este modo de rotura já tinha sido observado no trabalho de Fernandes (2011), no qual os ensaios de flexão foram efectuados com roletes metálicos.

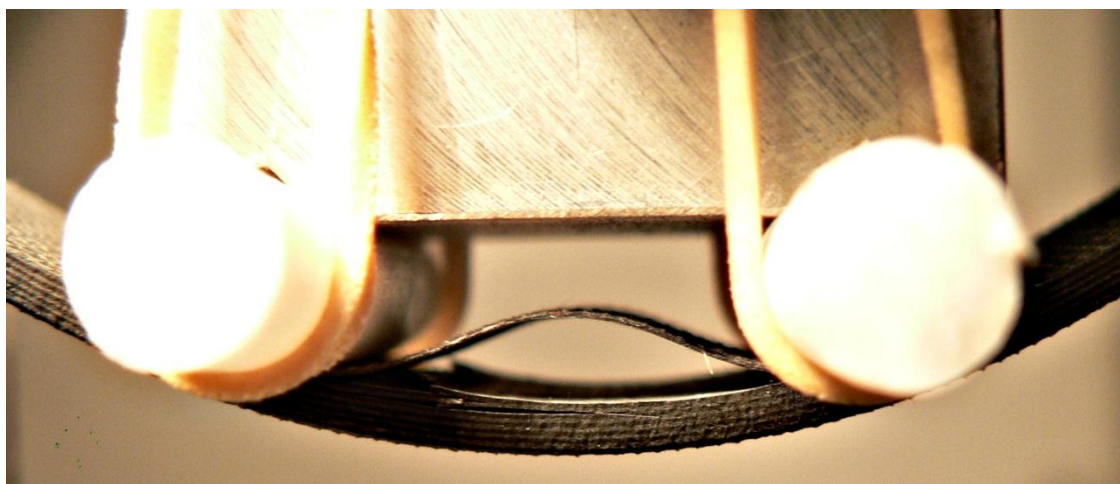


Figura 41 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C1 = $[(0/90)_6/0]$ no instante da rotura.



Figura 42 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C2 = $[(0/90_2)_4/0]$ no instante da rotura.

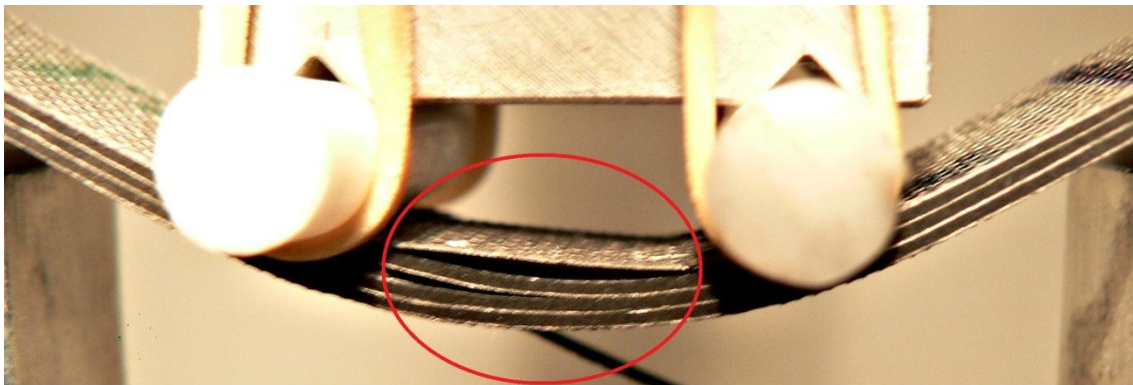


Figura 43 Fotografia de ensaio de flexão de provete do laminado C3 = $[(0/90_3)_3/0]$ no instante da rotura.

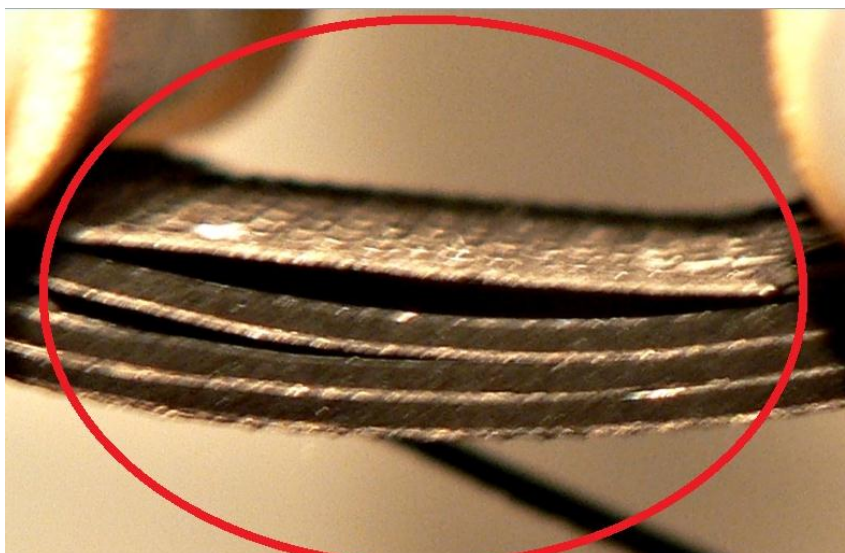


Figura 44 Ampliação da zona de rotura à flexão de provete do laminado C3 = $[(0/90_3)_3/0]$.

Conforme é descrito no capítulo 3, calcularam-se a partir das curvas carga-deslocamento os módulos de flexão apresentados na figura 45. As dispersões nos módulos foram relativamente baixas, mas, à semelhança do que se verificou nos ensaios de compressão de provetes híbridos, os valores ficaram algo abaixo das previsões da TCL. Isto reforça a ideia de ter havido desalinhamentos no corte dos provetes a partir das placas.

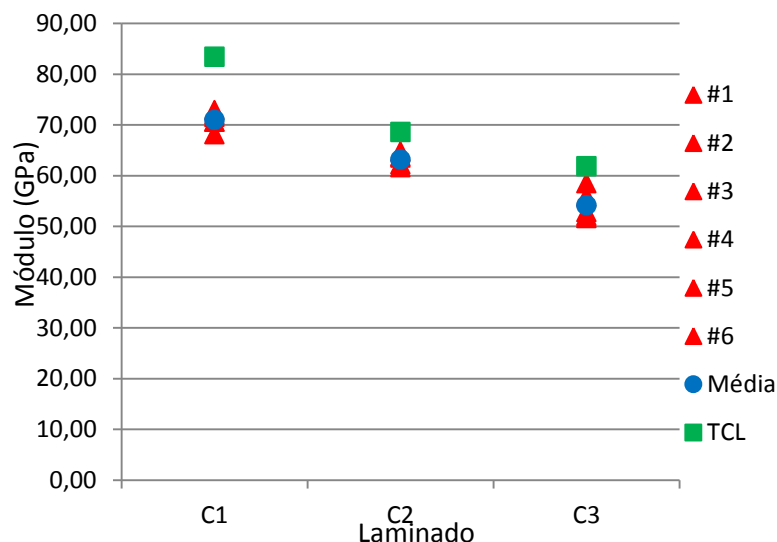


Figura 45 Módulo à flexão medido para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL. Os desvios padrão foram de 2.28% para C1, 1.96% para C2 e 5.41% para C3.

A figura 46 apresenta as tensões de rotura obtidas das cargas máximas medidas nos ensaios. Como seria de esperar, a resistência foi proporcional ao número de camadas a 0° dos laminados.

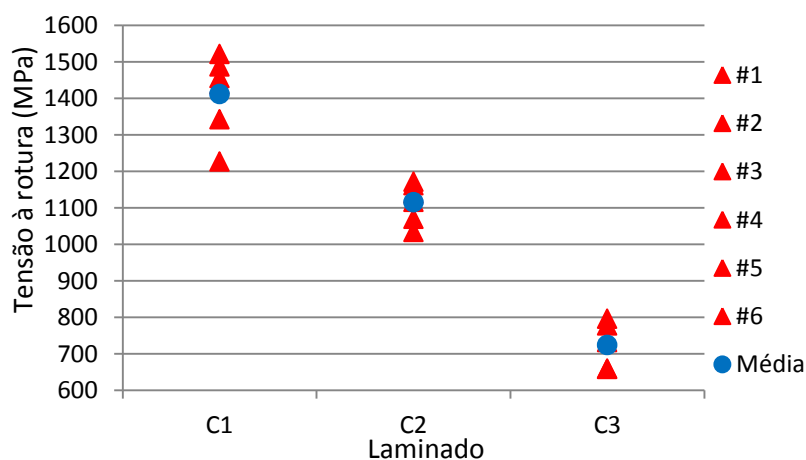


Figura 46 Tensões à rotura: valores de cada provete e valor médio. Os desvios padrão foram de 7,72% para C1, 4,84% para C2 e 8,90% para C3.

Finalmente, recorreu-se novamente à TCL para cálculo das tensões longitudinais σ_1 nas camadas a 0° no momento da rotura (Figura 47). Notou-se que as tensões calculadas foram substancialmente mais elevadas do que as obtidas nos ensaios de flexão realizados por Fernandes (2011). Isto confirma que a substituição dos rolos metálicos por rolos flexíveis foi favorável, na medida em que o fenómeno da encurvadura por delaminação ocorreu a cargas mais elevadas. De salientar que, face a este modo de rotura, as tensões calculadas não podem ser consideradas estimativas da tensão de rotura longitudinal à compressão, definido apenas um limite inferior para esta. Além disso, como foi acima referido, há fortes indícios de desalinhamentos face aos módulos obtidos terem ficado aquém das previsões da TCL e de resultados experimentais anteriores [Fernandes, 2011].

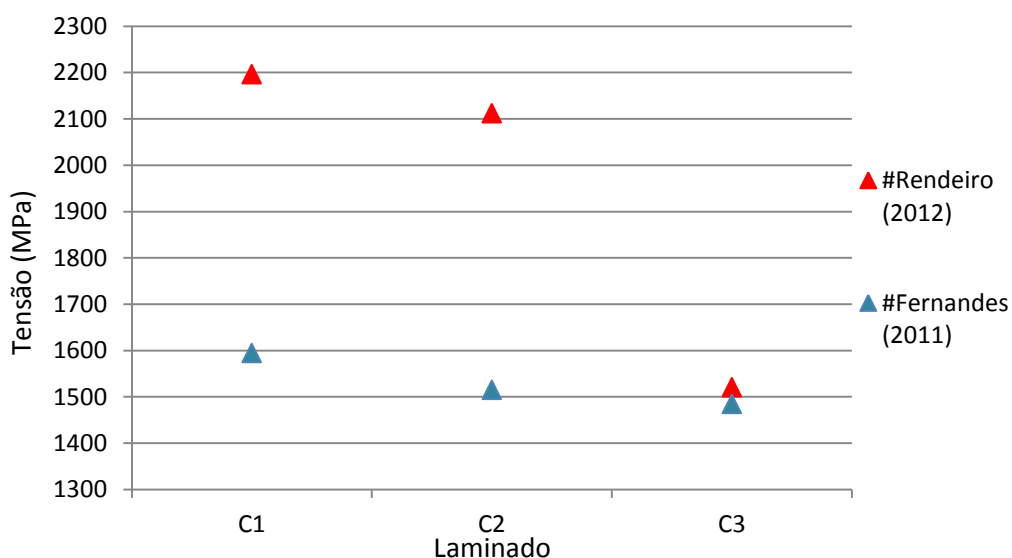


Figura 47 Tensões longitudinais σ_1 nas camadas a 0° no momento da rotura.

Capítulo 5 **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

As principais conclusões sobre este trabalho são as seguintes:

- Os ensaios de compressão dos laminados unidireccionais [90°], que foram realizados por aplicação direta de carga nos topos, deram bons resultados para as propriedades transversais, isto é, módulo de elasticidade, tensão e deformação de rotura.
- Por seu turno, nos ensaios de provetes híbridos de laminados cruzados os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão longitudinal da camada ficaram aquém do esperado, atendendo a valores medidos em trabalhos anteriores. Isto deveu-se provavelmente a problemas de preparação das amostras, tais como desalinhamentos no corte por jato de água.
- Os valores do módulo de flexão medidos em ensaios realizados nos mesmos laminados cruzados ficaram também abaixo do esperado, confirmando problemas de preparação dos provetes. Porém, a substituição dos rolos metálicos por rolos flexíveis foi favorável na medida em que o fenómeno da encurvadura por delaminação ocorreu a cargas mais elevadas, indicando valores elevados para a resistência à compressão longitudinal da camada.

Tendo em conta todo o estudo efetuado, sugere-se para trabalhos futuros:

- Repetição dos ensaios de provetes híbridos no sentido de avaliar efectivamente os resultados quando os provetes são devidamente preparados;
- Estudar em mais pormenor os ensaios de flexão com roletes flexíveis para medição da resistência à compressão longitudinal da camada, usando outros tipos de laminados e diferentes dimensões.

Capítulo 6 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [Adams, 2005] Adams, D. F. <http://www.compositesworld.com/articles/current-compression-test-methods.aspx>. (2005). Acedido em Fevereiro de 2012.
- [Faria, 2010] Faria, R. D. D. Caracterização do comportamento mecânico de adesivos epóxicos. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2010.
- [Fernandes, 2011] Fernandes, V. C. O. Fissuração transversal e delaminação em laminados cruzados, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2011.
- [Freitas, 2008] Freitas, M. J. M. Apontamentos das aulas de Materiais Compósitos Laminados. IST, 2008.
- [Gibson, 2007] Gibson, R. F. Principles of composite material mechanics. CRC Press, 2nd edition, 2007.
- [Hodgkinson, 2000] Hodgkinson, J. M. Mechanical testing of advanced bre composites:. Woodhead Publishing Ltd, 2000.
- [Lackey, 2009] Lackey, E. Identification, Selection, and development of composite test standards - a case study from the development of desing standard for composites. 9th-Annual Automotive Composites Conference and Exhibition, Troy, USA, 2009.
- [Mazumdar, 2002] Mazumdar, S. K.. Composites manufacturing: materials, product and process engineering. CRC Press, 2002.
- [Morais e Pereira, 2007] A. B. de Moraes, A. B. Pereira, Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates, Composites Part A, 38:785-794, 2007.
- [Moura e outros, 2005] Moura, M. F. S. F., Moraes, A. B., Magalhães, A. G. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, Publindústria, 2005.
- [Neves, 2009] Neves, V. L. V. Comportamento mecânico de compósitos com aplicações navais. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2009.

- [Neves e outros, 2011] Neves, V. V., Morais A. B., Pereira, A.B., Faria, R. D. Compression Behavior of Woven Glass/Epoxy Specimens Using a New End-Loaded hybrid Specimen. *Polymer Composites*, Vol. 32:491-496, 2011.
- [Reddy, 2004] Reddy, J. N. *Mechanics of Laminated Composite Plates*. CRC Press, 2nd edition, 2004.
- [Schurmann e Puck, 2002] H. Schurmann. Puck, A. A failure analysis of frp laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, Vol. 62:1633-1662, 2002.
- [Squires e outros, 2006] Squires, Charlene A., Netting, Keith H., Chambers, Alan R. Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composites, November 2006.
- [Wegner e Adams, 2000] Wegner, P. M., Adams, D. F. Verification of the combined load compression (CLC) test method. DOT/FAA/AR-00/26, 2000.

Capítulo 7 ANEXOS

A.

Ensaaios de Compressão

Tabela 5 Resumo dos valores do módulo de elasticidade medidos para cada provete híbrido, valor médio da amostra e previsão da TCL.

Provete/Laminado	E (GPa)		
	C1	C2	C3
#1	64,25	44,25	43,60
#2	67,23	45,27	45,63
#3	66,27	49,39	45,72
#4	67,70	40,44	45,07
#5			45,86
Média	66,75	44,76	45,63
TCL	74,05	55,24	45,83

Tabela 6 Resumo dos valores da deformação de rotura medidos para cada provete híbrido, valor médio da amostra e desvio padrão.

Provete/Laminado	ϵ_{uc} (%)		
	C1	C2	C3
#1	1,46	1,72	1,64
#2	1,41	1,72	1,56
#3	1,68	1,68	1,71
#4	1,30	1,79	
Média	1,46	1,73	1,64
Desv. Padrão (%)	11,11	2.52	4.53

Tabela 7 Resumo dos valores das tensões de rotura medidos para cada provete híbrido, valor médio da amostra e desvio padrão.

Provete/Laminado	σ_{uc} (MPa)		
	C1	C2	C3
#1	748	567	536
#2	759	567	515
#3	736	580	529
#4			486
Média	747	571	516
Desv. Padrão (%)	1.50	1.25	4.31

Tabela 8 Resumo de estimativas da tensão de resistência à compressão longitudinal da camada em cada laminado, valor médio da amostra e desvio padrão.

Provete/Laminado	σ_{uc1} (MPa)		
	C1	C2	C3
#1	1313	1335	1520
#2	1180		1460
#3	1332	1335	1500
#4	1288	1364	1377
Média	1278	1345	1464
Desv. Padrão (%)	5.32	1.25	4.31

B.

Ensaaios de Flexão

Tabela 9 Resumo dos valores do módulo de flexão medidos para cada provete, valor médio da amostra e previsão da TCL.

Provete/Laminado	E (GPa)		
	C1	C2	C3
#1	68,15	61,64	58,50
#2	71,53	63,53	51,62
#3	70,62	62,22	55,83
#4	70,62	64,72	52,07
#5	71,98	63,78	52,82
#6	72,86		
Média	70,96	63,18	54,17
TCL	83,39	68,60	61,86

Tabela 10 Resumo dos valores das tensões de rotura medidos para cada provete, valor médio da amostra e desvio padrão.

Provete/Laminado	σ_u (MPa)		
	C1	C2	C3
#1	1343	1162	732
#2	1456	1116	777
#3	1227	1172	659
#4	1439	1034	658
#5	1522	1070	796
#6	1488	1139	
Média	1412,4	1115,5	724,5
Desv. Padrão (%)	7,72	4,84	8,90

Tabela 11 Resumo dos valores das tensões longitudinais σ_1 nas camadas a 0° no momento da rotura.

Provete*/Laminado	σ_1 (MPa)		
	C1	C2	C3
#Rendeiro (2012)	2196,44	2112,35	1520,66
#Fernandes (2011)	1594,33	1515,18	1484,80

*Utilizou-se a média de todos os provetes ensaiados para cada tipo de laminado.